

CBPF – CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS
Rio de Janeiro – RJ

Primeira Comprovação Experimental da Relação $E=mc^2$
Einstein, a Física Nuclear e seus Impactos na Sociedade Moderna

por

Odilon A. P. Tavares



Conteúdo

Prólogo	1
1. Equivalência entre massa e energia	1
2. Experiência de Cockcroft e Walton	1
3. $E = mc^2$ e a Física Nuclear	3
3.1. Transformação de massa em energia	3
Radioatividade alfa	3
Fissão de núcleos atômicos	3
Fusão nuclear	4
3.2. Transformação de energia em matéria	5
Produção de pares elétron-pósitron	5
Elementos superpesados	6
Produção artificial de mésons pi	7
4. Benefícios para o homem moderno	8
Epílogo	9
Tabela 1	9
Referências e Notas	9
Para quem quiser saber mais	11
Agradecimento	11
Créditos às Figuras e Fotos	11

Primeira Comprovação Experimental da Relação $E = mc^2$

Einstein, a Física Nuclear e seus Impactos na Sociedade Moderna

Odilon A. P. Tavares

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF/MCT, Rio de Janeiro, Brazil

Prólogo

Comemora-se este ano em todo o mundo o centenário das publicações das idéias de Albert Einstein (1879–1955) sobre um novo modo de pensar a Física, as quais transformaram não só o pensamento científico e filosófico do século XX como também o cotidiano de grande parte da humanidade. O presente artigo foi preparado dentro deste contexto de celebração no Ano Internacional da Física e de seu personagem central, Albert Einstein, quem iniciou a grande revolução que modificou completamente, e para melhor, o dia-a-dia do homem moderno.

O texto é singelo, despretensioso, e procura tão somente salientar alguns aspectos interessantes e importantes sobre a presença da Física Nuclear nos dias de hoje, remetendo, quando possível, o leitor não-físico às idéias e/ou personagens que as geraram, buscando sempre correlacioná-los direta ou indiretamente com a famosa fórmula de Einstein $E = mc^2$.

1. Equivalência entre massa e energia

A famosa fórmula de Einstein $E = mc^2$ resultou dos dois postulados da sua assim chamada Teoria da Relatividade Especial, enunciados em 1905 [1]:

1^o Postulado (Princípio da Relatividade): As leis da Física são as mesmas em todos os sistemas de referência inerciais [2].

2^o Postulado (Constância da Velocidade da Luz): A velocidade da luz no vácuo, c , é uma constante independente do movimento da fonte e do observador [3].

Estes permitiram obter o seguinte resultado extraordinário: “A variação ΔE_c da energia cinética (isto é, energia de movimento) de um corpo é diretamente proporcional à variação Δm da massa desse corpo, sendo o quadrado da velocidade da luz no vácuo, c^2 , o fator de proporcionalidade”, quer dizer

$$\Delta E_c = c^2 \Delta m . \quad (1)$$



Se m_0 representar a massa do corpo quando em repouso, isto é, quando $E_c = 0$, e m representar a massa

quando a energia cinética adquirir o valor E_c , resultam $\Delta E_c = E_c$ e $\Delta m = m - m_0$. Por conseguinte, a relação (1) conduz ao resultado $E_c = c^2(m - m_0)$, ou seja,

$$E = mc^2 = E_c + m_0c^2 \quad (2)$$

Nesta última relação, E representa a energia total do corpo, quer dizer, a soma de sua energia cinética, E_c , mais a energia associada à sua “massa de repouso”, m_0c^2 . Assim sendo, as grandezas físicas massa e energia são equivalentes, e ambas podem ser expressas indistintamente em unidades de massa ou unidades de energia.

Toda massa m (ou m_0) é equivalente a uma quantidade de energia igual a mc^2 (ou m_0c^2)

E o contrário também é verdadeiro:

Toda quantidade de energia E é equivalente a uma massa igual a E/c^2

Na Física Nuclear costuma-se expressar massa ou energia em milhões de elétron-volt (MeV), ou em unidades de massa atômica (u) [4], valendo a seguinte correspondência:

$$1 \text{ u} = 931,494 \text{ MeV} = 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg} = \quad (3)$$

$$1,49242 \times 10^{-10} \text{ Joule} = 3,56697 \times 10^{-11} \text{ cal} ,$$

que equivale, aproximadamente, à energia que seria consumida para levantar uma pulga (das pequenas, claro) a uma altura de um décimo de milímetro!

2. Experiência de Cockcroft e Walton

A equivalência entre massa e energia foi comprovada diretamente em laboratório pela primeira vez

em 1932, quando o inglês John Douglas Cockcroft (1897–1967) e o irlandês Ernest Thomas Sinton Walton (1903–1995) (Fig. 1) conseguiram produzir partículas alfa energéticas [5] a partir do bombardeamento de alvos de lítio e flúor com prótons acelerados a energias de até 0,7 MeV.

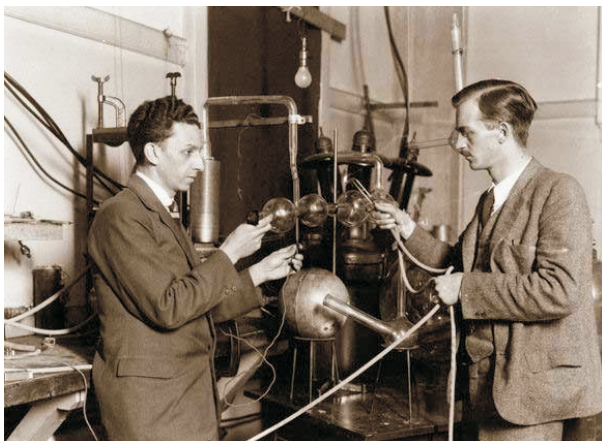


FIG. 1: John Cockcroft e Ernest Walton no Cavendish Laboratory, Cambridge (Inglaterra).

A histórica e comprovadora experiência de Cockcroft e Walton [6], realizada no Laboratório Cavendish, em Cambridge (Inglaterra), está representada esquematicamente na Fig. 2. Primeiro, eles idealizaram e desenvolveram um método simples e econômico com o qual conseguiram acelerar partículas carregadas (íons de hidrogênio) de tal modo a adquirirem energia suficiente para provocarem transmutações nucleares [7].

Na presente experiência, prótons acelerados até 0,5 MeV atingem o alvo em A. O sistema de detecção (em B e B') consistia de uma tela fluorescente de sulfeto de zinco próxima a um sistema ótico simples de observação das cintilações provocadas pelas partículas α eventualmente produzidas nas colisões dos prótons incidentes com o alvo.

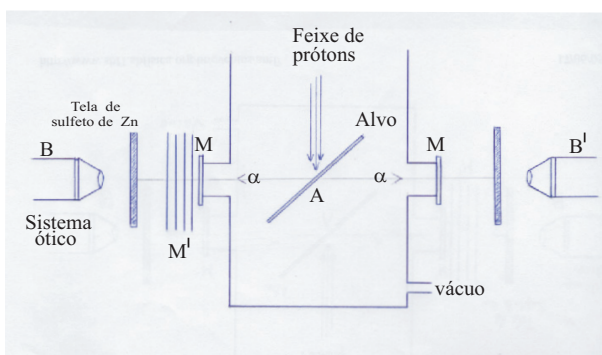
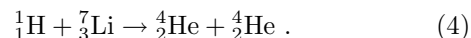


FIG. 2: Esquema da experiência de Cockcroft e Walton.

Uma folha de mica M mantinha o vácuo na câmara de alvo, e possuía espessura capaz de evitar cintilações espúrias devidas aos prótons espalhados. Uti-

lizando lítio como alvo, Cockcroft e Walton observaram cintilações que foram demonstradas provenientes de partículas α . Quando introduziram lâminas adicionais de mica (M') de absorção conhecida, constataram que as partículas nucleares produzidas tinham alcance no ar equivalente a ~ 8 cm. Com instrumentos mais sensíveis e precisos (uma câmara de ionização [8] e uma câmara de Wilson [9]) verificaram tratar-se de fato de partículas α de 8,4 cm de alcance no ar, correspondendo a uma energia cinética de $\sim 8,5$ MeV. Cockcroft e Walton concluíram, desse modo, tratar-se da reação



Como a velocidade dos prótons incidentes ($\lesssim 3\%$ de c) era pequena em comparação com a das partículas α observadas ($\sim 7\%$ de c), eles admitiram que as duas partículas α produzidas deveriam ter velocidades iguais e opostas. Esta hipótese de fato verificou-se quando, utilizando um alvo de lítio suficientemente fino, puderam observar cintilações simultâneas (em B e B'), as quais evidenciavam tratar-se de partículas α originárias de uma única desintegração.

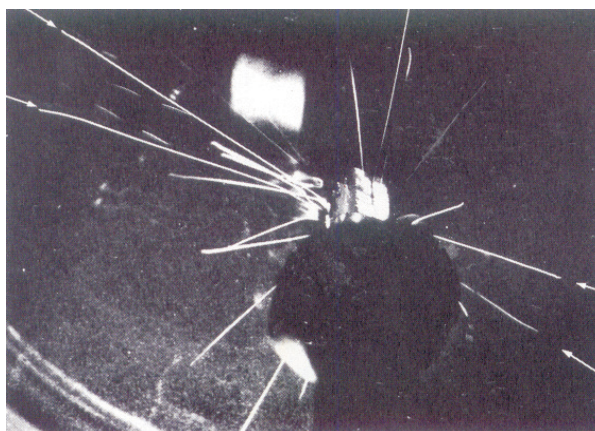


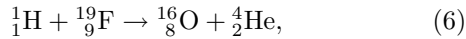
FIG. 3: Fotografia em câmara de Wilson de pares de partículas α opostas (indicados por setas) da desintegração do lítio por prótons.

Aplicando o balanço de massa-energia (relação (2)) à reação nuclear (4) usando os valores de massa conhecidos àquela época, e desprezando a massa equivalente à energia cinética dos prótons incidentes (como fizeram Cockcroft e Walton [6]), eles obtiveram um decréscimo de massa igual a

$$\Delta m = 1,0072 \text{ u} + 7,0104 \text{ u} - 2 \times 4,0011 \text{ u} = 0,0154 \text{ u} . \quad (5)$$

Este decréscimo de massa era equivalente a uma quantidade de energia liberada igual a 14,3 MeV, com um erro provável de 2,7 MeV proveniente da incerteza na determinação da massa do ${}^7\text{Li}$. A energia liberada estava sendo manifestada como energia cinética das partículas α , cabendo a cada uma $\sim 7,2$ MeV, ou 8,5 MeV se for levado em conta a incerteza acima mencionada. Este resultado era, portanto, consistente com a energia cinética das partículas α ($\sim 8,5$ MeV) como obtida a partir do alcance medido no ar [10].

O mesmo aconteceu quando o alvo de lítio foi substituído por um de flúor. Partículas α de alcance no ar de 2,8 cm foram observadas, correspondendo a uma energia de 4,15 MeV. Admitindo que estivesse acontecendo a reação



Cockcroft e Walton usaram valores de massa disponíveis à época, com os quais calcularam uma energia liberada de 5,2 MeV correspondente ao decréscimo de massa da reação nuclear (6). A partir daí, estimaram a energia cinética das partículas α como sendo 4,3 MeV, o que estava em bom acordo com o valor obtido das medidas de alcance no ar [11].

Desse modo, Cockcroft e Walton não só foram os primeiros a utilizar um acelerador para produzir desintegrações nucleares, como também foram os primeiros a demonstrar de forma direta e experimentalmente a equivalência entre massa e energia. Ambos receberam o Prêmio Nobel de Física em 1951.

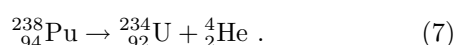
É importante salientar que a equivalência entre massa e energia, consequência da Teoria da Relatividade Especial de Einstein, estava fortemente em contradição com a Mecânica Newtoniana, bem estabelecida à época. Einstein não possuía, nos primeiros anos do século XX, nenhuma evidência experimental em seu favor. Esta foi, finalmente, oferecida brilhantemente por Cockcroft e Walton, 27 anos após o anúncio da Teoria [12].

3. $E = mc^2$ e a Física Nuclear

É excepcionalmente notável o fato de que o pensamento científico de Einstein em 1905 precedeu as descobertas que deram o fundamento à Física Nuclear. Naquela época não se sabia o que era uma partícula α , que os átomos possuíam um núcleo, o próton e o nêutron ainda não haviam sido identificados, e as massas atômicas careciam de medidas razoavelmente aceitáveis. Quase três décadas depois a equivalência entre massa e energia tornou-se o fundamento para quantificar as energias envolvidas em todos os processos de transmutação nuclear, sejam eles espontâneos (as diferentes formas de radioatividade natural, fissão espontânea e outros) ou induzidos (reações nucleares em geral). Alguns poucos exemplos ilustram bem o alcance e a importância da transformação de massa em energia e vice-versa regida pela relação de Einstein $E = mc^2$.

3.1 Transformação de massa em energia

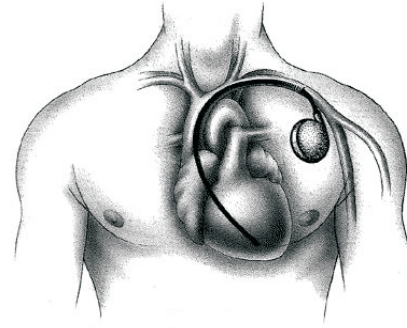
A **radioatividade alfa** (transmutação espontânea de um núcleo atômico em outro por emissão de uma partícula α) acontece com a grande maioria dos núcleos pesados devido ao decréscimo de massa do núcleo original em relação aos produtos formados. Assim, plutônio pode transmutar-se em urânio por emissão de uma partícula α :



Neste caso, o balanço de massa-energia é (Tabela 1)

$$[237,998858 \text{ u} - (233,991302 \text{ u} + 4,00150618 \text{ u})] \times 931,494 \text{ MeV/u} = 5,63 \text{ MeV}. \quad (8)$$

Este decréscimo de massa aparece quase que totalmente ($\sim 98\%$) sob a forma de energia cinética da partícula α . Esta energia pode ser utilizada convenientemente no funcionamento de pequenas baterias atômicas de geração de eletricidade, e que podem, por exemplo, ser transportadas em satélites artificiais ou servir para uso médico em marca-passos cardíacos. Estes dispositivos



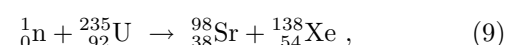
(ilustração acima) utilizam cerca de 160 mg de plutônio-238 confinados numa cápsula metálica de alta resistência e pesam pouco mais de 100 g. Os marca-passos cardíacos têm sido largamente implantados no tórax de pacientes e conectados aos músculos do coração, restituindo assim a saúde a milhões de pessoas em todo o mundo.

A descoberta da **fissão de núcleos atômicos** em dezembro de 1938 [14–16] pode ser considerada um dos acontecimentos científicos de maior impacto na sociedade moderna. A fissão é o fenômeno pelo qual um núcleo atômico se divide em dois outros de massas comparáveis (Fig. 4), e ocorre sobretudo com núcleos pesados de número de massa ímpar e quando provocada por nêutrons.



FIG. 4: Estágios do processo de fissão segundo o modelo nuclear da gota líquida.

Nenhuma teoria física havia previsto este fenômeno. Foi uma mulher, Lise Meitner (1878–1968), quem propôs para o processo o nome *fissão nuclear*, forneceu a primeira interpretação física do processo, e previu a gigantesca quantidade de energia liberada na fissão [17]. No caso da incidência de nêutrons lentos sobre núcleos de urânio, um dos modos mais frequentes de partição é



para o qual o balanço de massa-energia

$$\begin{aligned} c^2\Delta m &= (1,0086649 \text{ u} + 234,994279 \text{ u} \\ &- 97,9076954 \text{ u} - 137,884541 \text{ u}) \times \\ &\times 931,494 \text{ MeV/u} \end{aligned} \quad (10)$$

fornece a enorme quantidade de energia $c^2\Delta m \approx 200$ MeV. Os fragmentos nucleares primários (estrôncio-98 e xenônio-138) prontamente emitem 2 a 3 nêutrons de $\sim 1-2$ MeV, e em seguida desintegram-se por emissão sucessiva de elétrons (desintegrações beta menos (β^-)) acompanhados de neutrinos [18].



FIG. 5: Lise Meitner: a física da fissão nuclear.

Os ~ 200 MeV disponibilizados no processo distribuem-se aproximadamente assim: 83% como energia cinética dos fragmentos; 2,5% como energia cinética dos nêutrons; 6% como radiação gama; outros 2,5% como energia dos elétrons e, finalmente, 6% como energia dos neutrinos. Além disso, e o que é extraordinário, os nêutrons de fissão podem provocar num período de tempo curtíssimo novas fissões em átomos vizinhos numa massa de urânio, de tal forma que uma reação em cadeia pode ter lugar com liberação de uma quantidade gigantesca de energia. Quando não controlada, pode-se ter uma grande explosão (a bomba atômica, como aquela testada pela primeira vez no deserto do Novo México em julho de 1945, e as lançadas em Hiroshima e Nagasaki em agosto do mesmo ano, pondo fim à segunda guerra mundial). Porém, quando a reação em cadeia é controlada de forma adequada, pode-se produzir energia útil para consumo (usinas nucleares de produção de eletricidade e reatores nucleares de potência para navios, entre muitos exemplos).

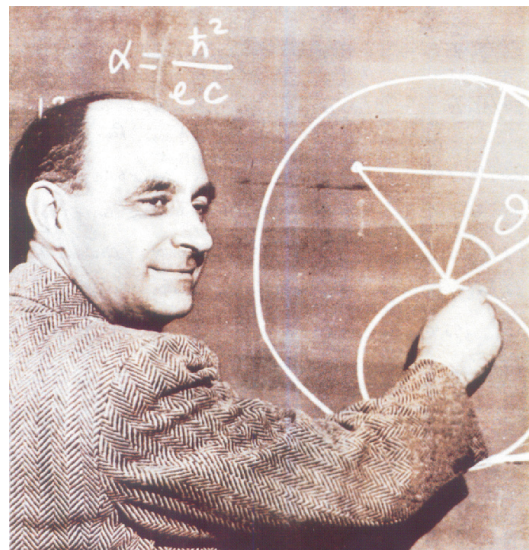
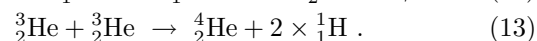
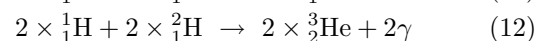
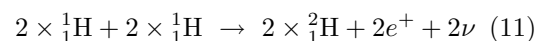


FIG. 6: Enrico Fermi: um gigante na Física Nuclear experimental (transmutações por nêutrons, 1934), teórica (teoria da desintegração beta, 1934) e aplicada (1^o reator nuclear, 1942).

O físico italiano Enrico Fermi (1901–1954) e seus colaboradores foram os que construíram o primeiro reator nuclear, em dezembro de 1942, na Universidade de Chicago (a potência era, então, equivalente à consumida por 3 lâmpadas de 60 W!). A primeira usina nuclear de produção de eletricidade em larga escala (Calder Hall, Inglaterra) entrou em operação em 1956, fornecendo uma potência equivalente ao consumo de um milhão e meio de lâmpadas de 60 W. Nos dias de hoje, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para assegurar energia mais segura e de forma sustentável [19–21].

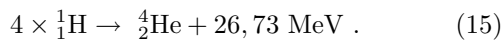
O processo de formar núcleos pequenos a partir de prótons e nêutrons individuais, ou formar núcleos maiores juntando núcleos pequenos, é chamado de **fusão nuclear**. Ela está acontecendo continuamente nas estrelas e, particularmente para nós, no Sol, produzindo a prodigiosa quantidade de energia radiante que nos ilumina, nos aquece, e mantém a vida na Terra. A energia produzida pelo Sol tem sido explicada como sendo proveniente de uma seqüência de reações de fusão conhecida como “seqüência próton-próton”, que se escreve



A letra grega γ (gama) que aparece na segunda reação representa a radiação eletromagnética também produzida, além dos neutrinos, ν , na primeira reação. Usando a tabela de massas nucleares (Tabela 1) pode-se calcular o decréscimo de massa Δm (e, portanto, a correspondente quantidade de energia liberada, $\Delta E = c^2\Delta m$) para cada uma das reações de fusão acima. Para a primeira, por exemplo, tem-se

$$\Delta E_1 = 4 \times 938,272 \text{ MeV} - 2 \times (1875,613 + 0,511) \text{ MeV} = 0,84 \text{ MeV} . \quad (14)$$

Procedendo analogamente para a segunda e terceira reações obtém-se $\Delta E_2 = 10,99 \text{ MeV}$ e $\Delta E_3 = 12,86 \text{ MeV}$. Além disso, cada um dos elétrons positivos (pósitrons) que se formam na primeira reação de fusão (11) se aniquila com um elétron negativo do meio estelar para produzir $2 \times (m_{e^+} + m_{e^-}) = 2 \times 1,02 \text{ MeV} = 2,04 \text{ MeV}$ de energia adicional (processo conhecido por *aniquilação elétron-pósitron*). Dessa forma, o efeito líquido da seqüência próton-próton é o da “queima” de quatro átomos de hidrogênio (${}^1_1\text{H}$) para formar um átomo de hélio (${}^4_2\text{He}$) com produção de $\Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3 + 2,04 \text{ MeV} = 26,73 \text{ MeV}$ de energia, que pode ser escrito resumidamente como



Entretanto, altíssimas temperaturas são necessárias para que possa ocorrer a fusão nuclear (por isso as reações de fusão são conhecidas freqüentemente por reações termonucleares). No Sol, a temperatura atinge milhões de graus, o que faz os núcleos se moverem bastante rapidamente, facilitando assim a fusão nuclear. A energia liberada mantém a temperatura sempre alta, conseqüentemente mais reações de fusão continuam a ocorrer, e assim um processo contínuo auto-sustentável é desenvolvido, mantendo o Sol “aceso”. Essas idéias foram anunciadas pela primeira vez em 1938 por dois físicos alemães, Hans A. Bethe (1906–2005) e Carl F. von Weizsäcker (1912–2003), independentemente [22,23].

A possibilidade (e os esforços daí decorrentes) de usar reações de fusão para construir reatores de potência de geração de energia elétrica para consumo geral tem sido considerada pelos cientistas e engenheiros nucleares nos últimos 50 anos. As reações de fusão de maior probabilidade de acontecer são aquelas que envolvem o deutério (${}^2_1\text{H}$) e o trítio (${}^3_1\text{H}$):

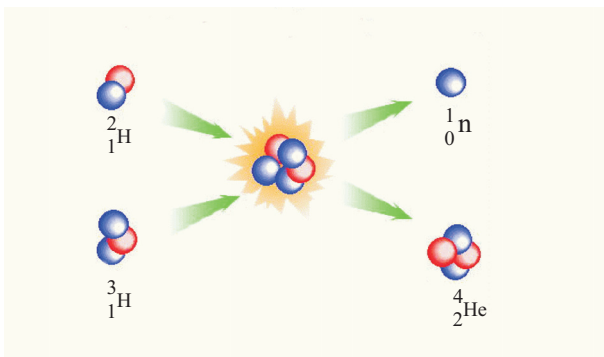
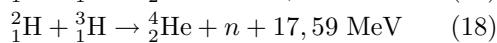
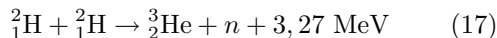
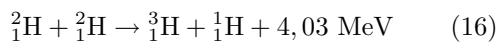


FIG. 7: Representação da fusão do deuteron com o trítion.

A tarefa tem se mostrado, entretanto, muito difícil porque são requeridas simultaneamente i) altas temperaturas (\sim centenas de milhões de graus) e ii) alta densidade e tempo de confinamento dos núcleos em “recipiente magnético” de tal modo a se ter o produto dessas duas grandezas não menor do que $\sim 3 \times 10^{20}$ segundo por metro cúbico. Ocorre que a temperaturas muito altas os átomos são ionizados (isto é, perdem os seus elétrons), e o conjunto de íons (núcleos positivos e elétrons negativos) é conhecido como *plasma*. Este deve permanecer confinado, por exemplo, por uma combinação de dois campos magnéticos num dispositivo de forma toroidal, conhecido por *tokamak* (Fig. 8). As condições para se conseguir a fusão termonuclear de forma controlada têm sido perseguidas nas últimas 4 décadas, e os especialistas estão com esperanças renovadas de poderem colocar em funcionamento, nas primeiras décadas deste século, um reator termonuclear para geração de eletricidade para consumo [24–27].

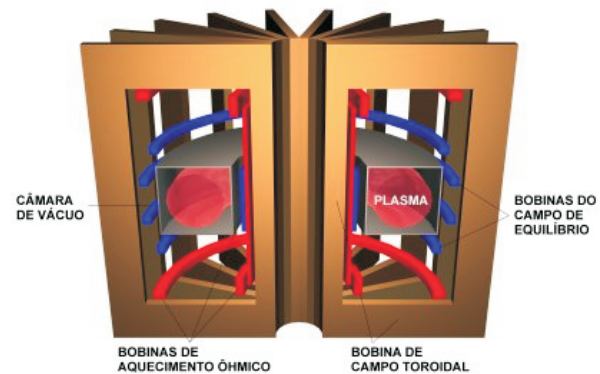


FIG. 8: Plasma no tokamak TCABR da Universidade de São Paulo (em operação).

Finalmente, é bom comparar a energia que é capaz de ser produzida pela fusão de deutérios (presentes na água na proporção de $\sim 33 \text{ mg}$ por litro) com a energia da fissão do urânio e a combustão de gasolina e carvão. Muito aproximadamente vale a seguinte equivalência: 1 litro de água ≈ 5 quilos de minério de urânio ≈ 85 litros de gasolina e ≈ 200 quilos de carvão, porém com a vantagem de que a água é, de longe, a mais abundante das substâncias, além de inesgotável.

3.2 Transformação de energia em matéria

Inúmeros são os exemplos de aplicação da relação de Einstein $E = mc^2$ na transformação de energia em matéria. Três serão aqui mencionados de forma breve.

Um dos processos pelos quais fótons (isto é, radiação eletromagnética) são absorvidos pelos materiais em geral é o da **produção de pares elétron-pósitron** (processo inverso do acima mencionado “aniquilação de pares elétron-pósitron”). Quando um fóton passa na vizinhança de um núcleo atômico, a interação entre ambos pode fazer com que o fóton desapareça, dando lugar

a um par elétron-pósitron (Fig. 9). Como a matéria

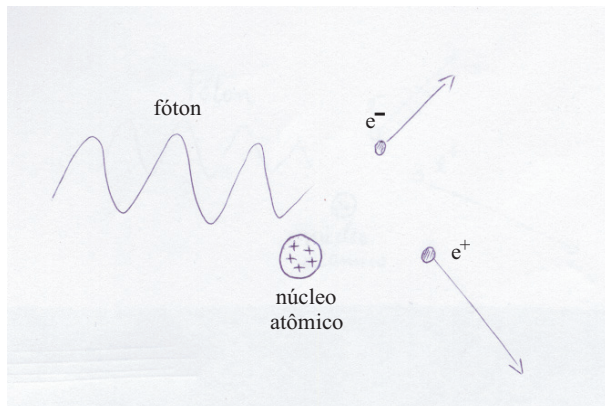
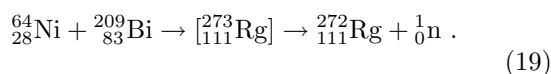


FIG. 9: Produção de um par elétron-pósitron

criada corresponde à massa de dois elétrons, o fóton precisa ter, no mínimo, duas vezes a massa do elétron, ou seja, $2 \times 0,511 \text{ MeV} = 1,02 \text{ MeV}$ de energia. Um fóton de energia 1,02 MeV corresponde a uma radiação eletromagnética de comprimento de onda extremamente pequeno ($\sim 10^{-12} \text{ m}$ ou menos), e recebe o nome de *radiação γ* . Quando a energia do fóton é maior do que 1,02 MeV o excedente é distribuído como energia cinética entre o par de partículas criado e o núcleo. A materialização de um fóton pode também ocorrer quando este interage com um elétron, necessitando, neste caso, de um mínimo de 2,04 MeV. A produção de pares é o principal mecanismo de blindagem para radiação de energia acima de $\sim 6 \text{ MeV}$, e é tanto mais freqüente quanto maior for a densidade de núcleos do material (por esse aspecto, os metais índio, platina, tungstênio, tântalo e ouro estão entre os melhores, porém chumbo é o material mais usado em blindagem contra as radiações por ser mais econômico).

Nos últimos 30 anos, grupos de físicos e químicos nucleares em diferentes países têm se empenhado em produzir os assim chamados **Elementos Superpesados** (aqueles de número atômico maior do que 103 e massa maior do que $\sim 250 \text{ u}$). Uma classe de reações nucleares para esta finalidade é a que utiliza bismuto ou chumbo como alvo fixo, e projéteis de núcleos ricos em nêutrons de elementos que variam do cálcio ao estrôncio [28]. O elemento de número atômico 111, para o qual foi aprovado o nome roentgenium (símbolo Rg [29]), e número de massa 272, foi sintetizado há cerca de uma década [30] segundo a reação



Este é um tipo de reação na qual primeiro ocorre a fusão do projétil com o alvo, formando um núcleo composto (no caso ${}^{273}_{111}\text{Rg}$) com pouca energia de aquecimento ($\sim 10\text{--}20 \text{ MeV}$), permitindo, em seguida, o núcleo composto emitir apenas um nêutron (Fig. 10) (essas reações são, por isso, freqüentemente chamadas de *reações de fusão frias*).

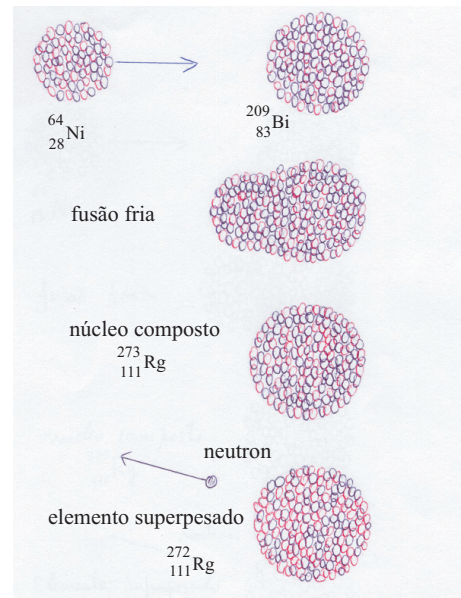


FIG. 10: Fases de um dos processos de produção de um núcleo superpesado.

No presente exemplo, há um ganho de massa extraordinário (equivalente a $\sim 237 \text{ MeV}$) obtido da diferença entre a soma das massas do núcleo produzido mais o nêutron e a das massas dos núcleos reagentes:

$$\begin{aligned} \Delta m &= [(272,094041 \text{ u} + 1,00866492 \text{ u}) - \\ &\quad - (63,9126468 \text{ u} + 208,935498 \text{ u})] \times \\ &\quad \times 931,494 \text{ MeV/u} = 237 \text{ MeV}. \quad (20) \end{aligned}$$

Este ganho de massa é proveniente da transformação de parte da energia cinética do núcleo projétil (${}^{64}\text{Ni}$), o qual deve adquirir a energia necessária ($\sim 320 \text{ MeV}$) num grande acelerador de íons pesados de tal forma a tornar a reação (19) viável (uma outra parte da energia incidente é gasta sob a forma de energia cinética do Rg e do nêutron). Entretanto, o elemento superpesado assim produzido tem vida curtíssima (da ordem de milésimos de segundo), pois experimenta desintegrações α sucessivas, transmutando-se rapidamente em elementos de massa e número atômico cada vez menores (Fig. 11). Até o presente foram sintetizados 15 elementos superpesados, os de número atômico 104 a 118 [31].

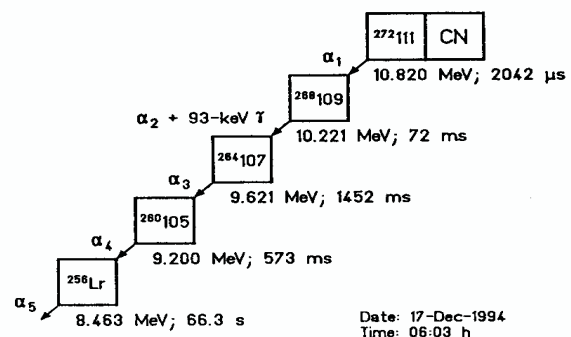


FIG. 11: Cadeia de desintegrações α do superpesado ${}^{272}_{111}$ (Ref. [30]).

Provavelmente o mais espetacular exemplo de transformação de energia em matéria seja o da **produção artificial de mésons pi**, conseguida de forma pioneira e extremamente criativa pelo físico brasileiro Cesar Lattes (1924–2005) em abril de 1948 na Universidade da Califórnia, Berkeley. Mésons pi são partículas sub-nucleares de massa aproximadamente 270 vezes maior que a massa do elétron, havendo três tipos de mésons pi (ou píons), os de carga elétrica positiva (π^+), negativa (π^-) e os que não possuem carga elétrica (π^0). Os píons carregados presentes na radiação cósmica haviam sido identificados um ano antes (1947) na Universidade de Bristol, a partir de exposições de chapas fotográficas especiais realizadas em altitudes de montanha (Pic du Midi, nos Pirineus, a 2800 m, e Monte Chacaltaya, nos Andes, a 5600 m), cujo sucesso deveu-se sobretudo à engenhosidade e iniciativa de Cesar Lattes [32].



FIG. 12: Cesar Lattes junto ao microscópio.

Mésons π são partículas que desempenham o papel de agentes, ou mediadores, da força nuclear, forte, de curto alcance, responsável pela coesão do núcleo atômico mantendo prótons e nêutrons fortemente ligados.

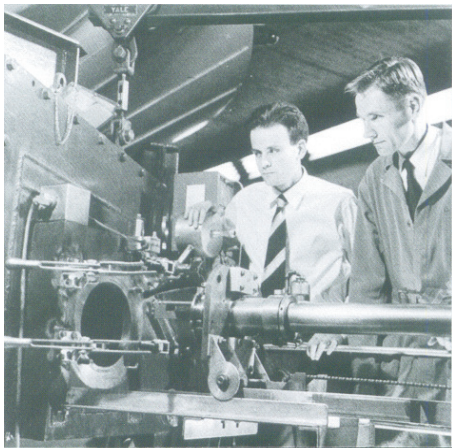
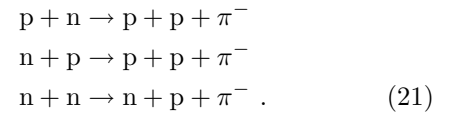


FIG. 13: Lattes e Gardner (1917–1950) juntos ao Cyclotron de Berkeley (1948).

A existência dos mésons π havia sido prevista em 1935 pelo físico japonês Hideki Yukawa (1907–1981). César Lattes, valendo-se do acelerador de partículas carregadas de Berkeley (o ciclotron de 184 polegadas), fez com que partículas α de 380 MeV colidissem contra um alvo fixo de carbono (^{12}C), de onde os mésons π^- produzidos eram defletidos em um campo magnético e registrados em um empilhamento de chapas fotográficas especiais para posterior identificação e análise por microscopia ótica [33].

Naquelas condições, a produção dos mésons π^- era compatível com o mecanismo de colisões nucleon-nucleon (Fig. 14), ou seja, colisões próton-nêutron, nêutron-próton ou nêutron-nêutron, conforme as reações



Um ganho de massa equivalente a

$$\begin{aligned} \Delta m &= m_p + m_{\pi^-} - m_n = (1,00727647 \text{ u} + \\ &+ 0,14983476 \text{ u} - \\ &- 1,00866492 \text{ u}) \times \\ &\times 931,494 \text{ MeV/u} \approx 140 \text{ MeV} \end{aligned} \quad (22)$$

resulta, portanto, de quaisquer dessas reações. Este ganho de massa é proveniente de parte da combinação da energia cinética da partícula α incidente com as energias cinéticas associadas ao movimento dos nucleons na partícula α e no núcleo alvo de carbono.

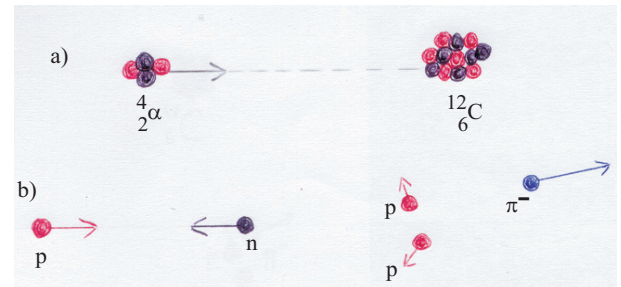


FIG. 14: a) núcleo alvo fixo de ^{12}C bombardeado por uma partícula α ; b) colisão próton-nêutron produzindo o méson π^- .

A produção dos mésons π em laboratório, após terem sido primeiro descobertos nos raios cósmicos, tendo como personagem central em ambos os eventos o brasileiro Cesar Lattes, dá início a uma nova era de investigações científicas a nível mundial. É o surgimento da Física das Partículas Elementares com o uso de aceleradores. A extraordinária repercussão desses feitos conduziu, logo em seguida, à fundação, no Rio de Janeiro, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas-CBPF (1949) [34], que foi fundamental para formar o ambiente propício à criação, no Brasil, de diversos outros organismos e instituições voltados à pesquisa científica que se tornaram de importância nacional e internacional.

Assim, foram criados o Conselho Nacional de Pesquisas - CNPq (1951), o Instituto de Matemática Pura e Aplicada - IMPA (1952), a Comissão Nacional de Energia Nuclear (1956), o Centro Latino Americano de Física - CLAF (1960), a Colaboração Brasil-Japão de Raios Cósmicos - CBJ (1962), o Laboratório Nacional de Computação Científica - LNCC (1980), e o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron - LNLS (1986). Raramente um experimento científico teve uma repercussão e conseqüências de espectro tão largo nos meios científico, político e econômico como o da descoberta dos mesons π .

4. Benefícios para o homem moderno

Sem dúvida alguma, a Física Nuclear tem contribuído de forma marcante para o bem estar da sociedade, notadamente durante as últimas cinco décadas. O esforço de guerra desenvolvido na primeira metade dos anos de 1940, e um número expressivo de grupos de pesquisa e instituições que se formaram em todo o mundo nas décadas seguintes, propiciaram extensa gama de aplicações em diferentes setores de atividades e serviços trazendo, sobretudo, conforto, saúde, segurança e bem estar geral às pessoas.

Na Medicina moderna a Física Nuclear está presente no cotidiano dos consultórios médicos, clínicas e hospitais, seja para diagnósticos (uso de pequenas quantidades de substâncias radioativas para exames de localização de tumores e lesões, tomografia por emissão de fótons, tomografia por emissão de pósitrons (Fig. 15), radiologia em geral, e outros), como na fase de tratamento (radioterapia, eletroterapia e, mais recentemente, protonterapia, e na produção de radiofármacos, para citar apenas alguns exemplos). Uma variedade de radionuclídeos tem sido usada seja para diagnóstico como para terapia, tais como índio-111, tálio-201, iodo-123, gálio-67, flúor-18, carbono-11, iodo-131, ítrio-90 e outros.

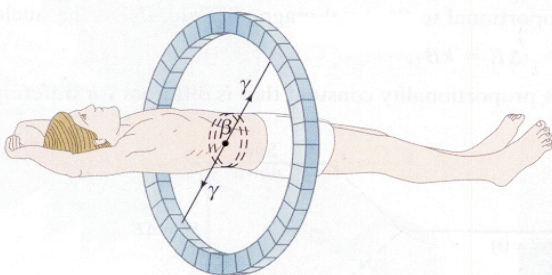


FIG. 15: Tomografia por emissão de pósitron (PET): um radioisótopo que se desintegra por emissão de pósitron é incorporado ao órgão a ser diagnosticado. Os pósitrons se aniquilam com os elétrons do meio produzindo dois raios gama em sentidos opostos, que são registrados em um anel de detectores.

Nas Engenharias os exemplos mais evidentes são os projetos de construção, funcionamento e gerenciamento

das Usinas Nucleares para produção de eletricidade, com a pesquisa e desenvolvimento do assim chamado Ciclo do Combustível que os acompanha (extração, moagem e refino do minério de urânio, conversão a hexafluoreto de urânio, enriquecimento no isótopo U-235, reconversão a óxido de urânio enriquecido, fabricação do elemento combustível, geração de energia no reator nuclear (Fig. 16), reprocessamento do combustível (separação e reciclagem do urânio e plutônio), separação de isótopos especiais e tratamento dos rejeitos radioativos). Paralelamente, há também os grandes projetos, nacionais e internacionais, que vêm sendo desenvolvidos em direção à geração de potência elétrica a partir dos reatores de fusão termonuclear controlada.

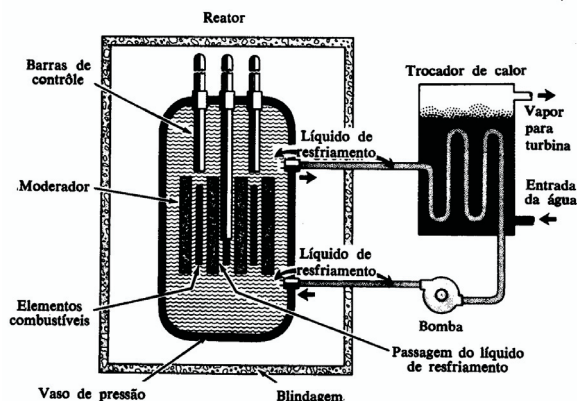


FIG. 16: Como a energia da fissão nuclear é utilizada num reator para produzir energia elétrica numa turbina a vapor.

A Física Nuclear também se faz presente nas questões relacionadas à proteção da população contra as exposições excessivas às radiações e seus efeitos sobre o organismo (é a Radiobiologia com suas inúmeras ramificações, como a Radiogenética e outras especialidades).

Também encontramos uma diversidade de aplicações da Física Nuclear não menos importantes para o homem hoje, tais como os procedimentos de esterilização de equipamento cirúrgico, irradiação de alimentos para conservação, marca-passos cardíacos, alarme contra incêndio, controle de qualidade de produtos industrializados, e tantas outras.

Na Geologia a Física Nuclear é de fundamental importância na prospecção de minérios de urânio e tório (de que o Brasil é detentor de expressivas reservas destes materiais estratégicos), e também na história geológica do planeta e do Sistema Solar (Geocronologia e Cosmofísica). A Física Nuclear está presente ainda nas Ciências e Tecnologia Espaciais (uso de radioisótopos em baterias nucleares para satélites, meteorítica, e áreas afins) e na Arqueologia, com a técnica, de há muito estabelecida, de datação de objetos pela desintegração radioativa do ^{14}C .

Por último, é importante mencionar as técnicas nucleares aplicadas na Agricultura como, por exemplo,

obtenção de variedades de plantas mediante irradiação de sementes, uso de radioisótopos na investigação do metabolismo das plantas, e muitas outras [35].

Todas essas aplicações (e muitas outras não mencionadas aqui) da Física Nuclear na atualidade estão fundamentadas na relação de Einstein $E = mc^2$. Eis aí a importância, clara e flagrante, da investigação científica desenvolvida de forma livre, espontânea, altamente criativa e sem as preocupações dos possíveis ou eventuais usos dela decorrentes.

Epílogo

Muitas são as lições que podemos extrair desta trajetória de um século de Física Moderna. As seguintes talvez sejam bastante instrutivas:

- A Ciência é uma aventura do espírito humano, onde novas verdades passam a ser conhecidas, muitas vezes de forma inesperada e surpreendente. É preciso, pois, investigar sempre;

- A Natureza é, por excelência, o objeto da investigação científica;

- As grandes revoluções se fazem no silêncio dos pequenos laboratórios;

- Não há Ciência sem o apoio da sociedade, e sem Ciência a sociedade sucumbe.

Finalmente, é desnecessário conjecturar sobre qual a mais importante, se a pesquisa científica pura ou a aplicada, se a experimental ou a teórica, se a de curto prazo ou a de longo prazo, aquela que exige recursos vultosos ou a de baixo custo, se a que é feita nas Universidades, nos Institutos de Pesquisa, nas Instituições da iniciativa privada ou mesmo de parcerias público-privadas, se a desenvolvida por grandes grupos de colaboração ou por um só pesquisador. Pesquisa científica importante é aquela bem feita, a de qualidade.

*O que é a ciência? Quando se sabe uma coisa, sustenta-se o que se sabe; não se sabe uma coisa, reconheça-se que não se sabe: eis aqui a ciência.**

Confúcio (551-479 a. C.)

Tabela 1 - Valores de massa de partículas e núcleos usados nesta publicação*

Partícula ou núcleo	Símbolo ou notação	massa** (u)
fóton	γ	0
elétron	β^- ou e^-	0,00054858
pósitron	β^+ ou e^+	0,00054858
méson π^-	π^-	0,14983476
nêutron	n ou 1_0n	1,00866492
próton	p ou 1_1H	1,00727647
déuteron	d ou 2_1H	2,01355321
trítion	t ou 3_1H	3,01550071
hélio-3	3_2He	3,01493224
hélio-4	α ou 4_2He	4,00150618
lítio-7	7_3Li	7,01435902
níquel-64	${}^{64}_{28}Ni$	63,9126468
estrôncio-98	${}^{98}_{38}Sr$	97,9076954
xenônio-138	${}^{138}_{54}Xe$	137,884541
bismuto-209	${}^{209}_{83}Bi$	208,935498
urânio-234	${}^{234}_{92}U$	233,991302
urânio-235	${}^{235}_{92}U$	234,994279
plutônio-238	${}^{238}_{94}Pu$	237,998858
roentgenio-272	${}^{272}_{111}Rg$	272,094041

*No caso de núcleos atômicos, embora as tabelas de massa forneçam valores de massas atômicas [37], os valores aqui listados referem-se a massas nucleares.

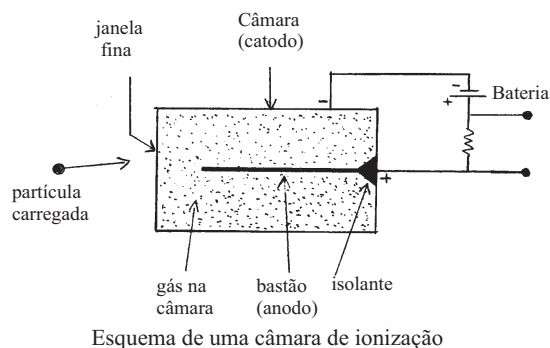
**Uma unidade de massa atômica (u) é equivalente a 931,494 MeV (ver nota [4]).

Referências e Notas

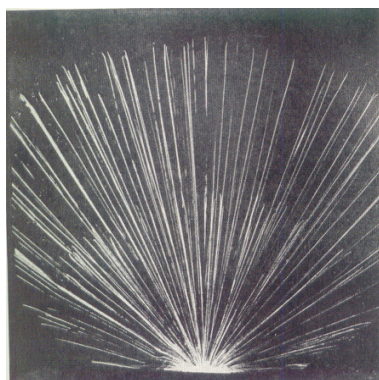
- [1] A. Einstein: Zur Elektrodynamik bewegter Körper [Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento], *Annalen der Physik* **17**, 891 (1905).
- [2] Sistemas de referência inerciais são aqueles que se deslocam com velocidade linear constante uns em relação aos outros.
- [3] A letra c costuma ser usada para representar a velocidade da luz no vácuo ($c \approx 3,0 \times 10^8$ m/s = 300 000 km/s).
- [4] Um elétron-volt (eV) é a quantidade de energia adquirida por um elétron acelerado numa diferença de potencial de 1 volt. A unidade de massa atômica (u) é definida como um doze avos da massa do átomo de carbono ${}^{12}_6C$, isto é, do átomo de carbono cujo núcleo possui 6 prótons e 6 nêutrons.
- [5] Partícula alfa é um tipo de radiação emitida por sais de urânio e tório que foi identificada pelos ingleses Ernest Rutherford (1871–1937) e Thomas Royds (1884–1955) em 1909 como sendo gás hélio duplamente ionizado (isto é, após perder seus dois elétrons). Dois anos depois, com a descoberta do núcleo atômico por Ernest Rutherford, a partícula alfa passou a ser entendida como o núcleo do átomo de hélio, por conseguinte não mais um tipo de radiação. Representa-se com o símbolo 4_2He (ou simplesmente α).

*Ref. [36].

- [6] J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton: Experiments with High Velocity Positive Ions. II. The Disintegration of Elements by High Velocity Protons, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A137**, 229 (1933) [veja também K. T. Bainbridge: The Equivalence of Mass and Energy, *Phys. Rev.* **44**, 123 (1933)].
- [7] J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton: Experiments with High Velocity Positive Ions. I. Further Developments in the Method of Obtaining High Velocity Positive Ions, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A 136**, 619 (1932).
- [8] Câmara de Ionização é um dispositivo que coleta, mediante uma diferença de potencial entre dois eletrodos, os íons produzidos no gás nela contido pela passagem de uma partícula carregada ou radiação (ver esquema abaixo).



- [9] Câmara de Wilson (ou de nuvem) é um instrumento que registra partículas carregadas usando o princípio de condensação do vapor d'água nos centros de condensação criados pelos íons produzidos ao longo da trajetória da partícula carregada (o interessante é que se pode ver o "rastros" deixado pela passagem da partícula carregada) (ver foto).



Trajatórias de partículas α do bismuto-212 e polônio-212 numa câmara de nuvem.

- [10] Usando valores atuais de massas nucleares (ver Tabela 1) obtém-se, agora não desprezando a energia cinética dos prótons incidentes sobre o alvo de lítio, $0,5 \text{ MeV}/(931,494 \text{ MeV/u}) + 1,007276 \text{ u} + 7,014359 \text{ u} - 2 \times 4,001506 \text{ u} = 0,019160 \text{ u}$, de onde se obtém 8,9 MeV para cada partícula α , o qual difere apenas de 4,7% do valor da energia cinética da partícula α medido àquela época.
- [11] Como a energia do próton incidente é pequena, os produtos da reação ^{16}O e ^4He movem-se em sentidos opostos com energias cinéticas inversamente proporcionais às suas massas.

- [12] O aumento relativo da massa de uma partícula de massa de repouso m_0 que se desloca com velocidade v relativamente a um dado referencial, $\Delta m/m_0 = (1 - v^2/c^2)^{-1/2} - 1$, também decorrente da Teoria da Relatividade Especial, foi comprovado experimentalmente pela primeira vez em 1908 pelo físico alemão Alfred Heinrich Bucherer (1863–1927) [13]. Assim, por exemplo, uma partícula que se desloca com velocidade $\sim 94\%$ da velocidade da luz no vácuo tem sua massa de repouso triplicada!
- [13] A. H. Bucherer: Messungen an Becquerelstrahlen. Die experimentelle Bestätigung der Lorentz-Einsteinchen Theorie (Medida nos raios de Becquerel. A confirmação experimental da Teoria de Lorentz-Einstein). *Phys. Zeitschr.* **9**, 755 (1908); A. H. Bucherer: Die experimentelle Bestätigung des Relativitätsprinzips (A confirmação experimental do Princípio de Relatividade). *Annalen der Physik* **28**, 513 (1909).
- [14] O. Hahn e F. Strassmann: Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle (Sobre a identificação e o comportamento dos metais alcalino-terrosos provenientes da irradiação de Urânio por meio de nêutrons). *Naturwiss.* **27**, 11 (1939); O. Hahn e Fritz Strassmann: Nachweis der Entstehung aktiver Bariumisotope aus Uran und Thorium durch Neutronenbestrahlung; Nachweis weiterer aktiver Bruchstücke bei der Uranspaltung (Identificação da produção de isótopos ativos de Bário pela irradiação de Urânio e Tório por nêutrons; identificação de outros fragmentos da fragmentação do Urânio). *Naturwiss.* **27**, 89 (1939).
- [15] L. Meitner e O. R. Frisch: Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction. *Nature* **143**, 239 (1939).
- [16] O. R. Frisch: Physical Evidence for the Division of Heavy Nuclei under Neutron Bombardment. *Nature* **143**, 276 (1939).
- [17] R. L. Sime: Lise Meitner and the Discovery of Nuclear Fission, *Scientific American* **278** (1), 58 (1998).
- [18] Desintegração beta é o processo no qual o núcleo pode emitir espontaneamente um elétron (β^-) acompanhado por um anti-neutrino ($\bar{\nu}$), ou um positron (β^+) acompanhado por um neutrino (ν). Neutrinos e anti-neutrinos são partículas de carga e massa nulas.
- [19] Rafael Cury: Reactores nucleares de quarta geração, em *Ciência Hoje on-line* (março, 2005).
- [20] A. C. O. Barroso, J. A. D. Dieguez e K. Imakuma: Energia Elétrica: Perspectivas Globais, as Aspirações do Brasil e o Papel da Geração Nuclear. *Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento* **5**(1), 1 (2003).
- [21] J. R. Maiorino, A. dos Santos e S. A. Pereira: The Utilization of Accelerators in Subcritical System for Energy Generation and Waste Transmutation - The World Status and a Proposal of a National R&D Program. *Braz. J. Phys.* **33**(2), 267 (2003).
- [22] C. F. von Weizsäcker: Über Elementumwandlungen in Innern der Sterne. II (Sobre a Transformação de Elementos no Interior das Estrelas. II). *Physikalische Zeitschrift* **39**, 633 (1938).
- [23] H. A. Bethe: Energy Production in Stars. *Phys. Rev.* **55**, 434 (1939).
- [24] Nelson Fiedler-Ferrari e Ivan C. Nascimento: Fusão Termonuclear Controlada. *Ciência Hoje* **7** (n.º 41), 44 (1988).
- [25] Tokamak no IFUSP: Fusão Nuclear, a energia do futuro. No site: www.usp.br.

- [26]] U. Samm: Controlled thermonuclear fusion at the beginning of a new era. *Contemporary Physics* **44**, 203 (2003).
- [27] International Thermonuclear Experimental Reactor ITER. No site: www.iter.org.
- [28] S. Hofmann, G. Münzenberg e M. Schädel: On the discovery of superheavy elements. *Nucl. Phys. News* **14**(4), 5 (2004).
- [29] O nome Roentgenium dado ao elemento 111 é para homenagear o cientista alemão Wilhelm Conrad Roentgen (1845–1923), quem descobriu os raios-X em 1895.
- [30] S. Hofmann e outros: The new element 111. *Z. Physik A* **350**, 281 (1995).
- [31] M. Leino: Structure and decay properties of the heaviest elements. *Nucl. Phys.* **A751**, 248c (2005).
- [32] F. Caruso, A. Marques e A. Troper (Editores): Cesar Lattes, a descoberta do méson π e outras histórias (CBPF/MCT, 1999); ver também A. Marques: A descoberta do méson π (CBPF, Rio de Janeiro, 1999).
- [33] E. Gardner e C. M. G. Lattes: Production of Mesons by the 184-Inch Berkeley Cyclotron. *Science* **107**, 270 (1948). É bom ver também J. Burfening, E. Gardner e C. M. G. Lattes: Positive mesons produced by the 184-Inch Berkeley Cyclotron. *Phys. Rev.* **75**, 382 (1949).
- [34] Alfredo Marques: CBPF: da Descoberta do Méson- π aos Dez Primeiros Anos. *Ciência e Sociedade* CBPF-CS-031/97 (1997).
- [35] Veja, por exemplo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP, no site: www.cena.usp.br.
- [36] C.J. Finger: The Essence of Confucianism (Haldeman-Julius Co., Girard Kansas, 1923) [Tradução de Chiang Sing, Ediouro, Rio de Janeiro, RJ].
- [37] G. Audi, A. H. Wapstra e C. Thibault: The AME2003 atomic mass evaluation. *Nucl. Phys.* **A729**, 337 (2003).
- g) D. C. Giancoli: Physics, principles with applications, 5th Edition (Prentice Hall, Upper Saddle River, N. Jersey, 1998), Capítulos 26, 30 a 32.
- h) K. C. Chung: Vamos falar de estrelas? (UERJ, Rio de Janeiro, 2000).
- i) A. M. R. de Andrade: Físicos, mésons e política: a dinâmica da ciência na sociedade (Editora Hucitec, São Paulo-SP, 1998).
- j) A. Marques (Editor): César Lattes 70 anos: A Nova Física Brasileira (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas-CBPF, Rio de Janeiro, 1994).
- k) A. I. Hamburger e A. A. P. Videira: Os Cinquenta Anos do Méson π (EXPOSIÇÃO), IFUSP, Estação Ciência (reimpressão 2005).
- l) G. R. Choppin e J. Rydberg: Nuclear Chemistry (Theory and Application) (Pergamon Press, Oxford, England, 1980), Capítulos 14 a 16.

Agradecimento

É uma honra para o autor ter podido contar com os Profs. Alfredo Marques e Emil Medeiros na revisão final do texto, criteriosa e competente, que tanto enriqueceu esta publicação. O autor deseja também expressar seu agradecimento a Margaret Q.N. Soares e Silva pela digitação dos manuscritos, e a Aline C. Dantas pela ajuda na organização das ilustrações. A excelente qualidade da composição gráfica por Maria do Socorro C. do Vale é especialmente reconhecida pelo autor.

CRÉDITOS ÀS FIGURAS E FOTOS

- Fig. 1:** The First Cyclotrons (American Institute of Physics);
- Fig. 3:** M.R. Wher and J.A. Richards, Jr.: Physics of the Atom (Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1960), pag.289;
- Ilustração à página 3:** Gilead Har'El's Memorial Site, in: "Arrhythmias and Sudden Cardiac Death" (a publication of the American Heart Association, Aug. 1995);
- Fig. 5:** Biographie: Lise Meitner (in: www.dhm.de/lemo/html/biografien/MeitnerLise/);
- Fig. 6:** The Great Thinkers (in: www.edinformatics.com/great_thinkers/fermi.htm);
- Fig. 8:** Departamento de Física Aplicada da USP (in: www.if.usp.br);
- Figs. 12 e 13:** A. I. Hamburger e A.A.P. Videira: EXPOSIÇÃO Os Cinquenta Anos do Méson π (reimpressão 2005), IFUSP, Estação Ciência;
- Fig. 15:** D.C. Giancoli: Physics, principles with applications, 5th Ed. (Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1998), pag. 965;
- Fig. 16:** G. Seaborg: Elementos Transurânicos Sintetizados pelo Homem (tradução de Fausto W. Lima, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1969), pag. 95;
- Foto à pag. 10:** E. Rutherford, J. Chadwick and C. D. Ellis: Radiations from Radioactive Substances (Cambridge University Press, Cambridge, 1930), placa II, Fig. 3.

Para quem quiser saber mais

- a) Albert Einstein: A Teoria da Relatividade Especial e Geral (Contraponto, Rio de Janeiro, 1999).
- b) C. L. Vieira: Einstein, o reformulador do Universo (Odysseus Editora, São Paulo-SP, 2003).
- c) I. C. Moreira e A. A. P. Videira (Orgs.): Einstein e o Brasil (UFRJ, Rio de Janeiro, 1995).
- d) I. S. Oliveira: Física Moderna para iniciados, interessados e aficionados (vol.1) (Ed. Livraria da Física, São Paulo-SP, 2005).
- e) M. R. Wher e J. A. Richard, Jr. : Física do Átomo (Ao Livro Técnico S. A. , Rio de Janeiro, 1965).
- f) E. Segrè: Dos raios-X aos quarks: Físicos Modernos e suas descobertas (Editora Universidade de Brasília, 1987).